

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2014

Jakub Janeček

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Vyšetřování dynamiky elektrického
neregulovaného DC pohonu s pulzním měničem**

**Investigation of the Dynamics of Electric
Uncontrolled DC Drive with Chopper**

2014

Jakub Janeček

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Janeček**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika
Téma: **Vyšetřování dynamiky elektrického neregulovaného DC pohonu s pulzním měničem**
Investigation of the Dynamics of Electric Uncontrolled DC Drive with Chopper

Zásady pro vypracování:

1. Popis struktury neregulovaného DC pohonu s pulzním měničem
2. Vytvoření matematického modelu DC pohonu
3. Sestavení simulačního modelu DC pohonu
4. Simulační ověření dynamiky DC pohonu

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Poděkování:

*Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce
panu doc. Ing. Ivo Neborákovi, CSc. za odborné vedení a ochotu při
konzultacích.*

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne 7.5.2014

Podpis:

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vytvořením simulačního modelu DC pohonu a jeho následným simulačním ověřením dynamiky. DC pohon se skládá z DC motoru (konkrétně DC motor s permanentními magnety typu PM80S/2), který je napájen z čtyřkvadrantového pulzního měniče napětí. Tento pohon je dále zatížen různými pracovními mechanizmy, kdy zatěžovací moment může být konstantní nebo závislý na rychlosti. Jsou zde zkoumány všechny důležité veličiny v závislosti na čase při rozbíhání DC motoru na jmenovité otáčky, ale i chování DC motoru při změně směru rychlosti. Správnost chování DC pohonu je pak ověřena pomocí srovnání teoretických a nasimulovaných zatěžovacích diagramů.

Návrh simulačního modelu DC pohonu byl vytvořen v programu Matlab v jeho nadstavbové části Simulink za pomoci základních bloků v jeho knihovnách a vytvořených m-file souborů.

Klíčová slova

DC pohon, DC motor, pulzní měnič, pracovní mechanismus, Matlab, Simulink,

Abstract

Bachelor thesis deals with creating a simulation model DC drive and its subsequent dynamics simulation verification. DC drive consists of a DC motor (namely, a DC motor with permanent-magnet type PM80S / 2), which is fed from four quadrant pulse voltage converter. This drive is further burdened by the various working mechanisms, when the load torque is either constant or depends on the speed. They are examined here all important data based on the time when the divergence of the DC motor at rated speed, but also the behavior of the DC motor when changing of speed. The correctness of the behavior of DC power is then verified by comparing the theoretical and simulated load diagrams.

Proposal simulation model DC power was created in MATLAB Simulink, part of the superstructure, using basic blocks in the libraries and created m-file file.

Key Words

DC drive, DC motor, chopper, working mechanism, Matlab, Simulink,

Seznam použitých symbolů

c	[-]	Konstrukční konstanta stroje
d_k	[m]	Průměr převáděcí kladky
g	[ms ⁻²]	Tíhové zrychlení
I_n	[A]	Jmenovitý proud
i	[-]	Převod převodovky
i_a	[A]	Proud kotvy
J_c	[Kgm ²]	Celkový moment setrvačnosti
J_{pm}	[Kgm ²]	Moment setrvačnosti pracovního mechanismu
K_{pm}	[-]	Zesílení pulzního měniče
L_{ac}	[H]	Indukčnost obvodu kotvy
M_e	[Nm]	Moment motoru
M_l	[Nm]	Moment zátěže
M_{pm}	[Nm]	Moment pracovního mechanismu
M_{red}	[Nm]	Redukovaný zatěžovací moment
m_v	[Kg]	Hmotnost vozíku
R_{ac}	[Ω]	Odpor obvodu kotvy
T	[s]	Perioda
T_{ac}	[s]	Časová konstanta
U_d	[V]	Usměrněné napětí
U_p	[V]	Pilové napětí
U_{pmax}	[V]	Maximální pilové napětí
U_{pmin}	[V]	Minimální pilové napětí
U_r	[V]	Řídící napětí
u_a	[V]	Napětí kotvy
u_i	[V]	Indukované napětí
W_n	[W]	Jmenovitý výkon

ϕ	[Wb]	Magnetický tok
η	[-]	Účinnost převodu
ω_n	[Rad/s]	Jmenovité otáčky
Ω_m	[Rad/s]	Úhlová rychlost motoru
Ω_{pm}	[Rad/s]	Úhlová rychlost pracovního mechanismu

Obsah

Úvod	1
1. Popis struktury neregulovaného DC pohonu s pulzním měničem	2
1.1 Princip DC motoru	2
1.2 Dělení DC motorů podle způsobů buzení magnetického pole	3
1.3 Stejnosměrný motor s permanentními magnety	3
1.4 Zapojení DC motoru s pulzním měničem	4
1.5 Pracovní mechanismy	5
2. Vytvoření matematického modelu DC pohonu	9
2.1 Vytvoření matematického modelu motoru	9
2.2 Vytvoření matematického modelu čtyřkvadrantového pulzního měniče	10
2.3 Vytvoření matematického modelu pracovního mechanismu	13
3. Sestavení simulačního modelu DC pohonu	16
3.1 Sestavení simulačního modelu motoru	16
3.2 Sestavení simulačního modelu čtyřkvadrantového pulzního měniče	17
3.3 Sestavení simulačního modelu pracovního mechanismu	19
3.4 Sestavení konkrétních simulačních modelů	20
4. Simulační ověření dynamiky DC pohonu	22
4.1 Konstantní jmenovitý moment M_n	22
4.2 DC motor s náběžnou hranou napětí U_a	24
4.3 DC motor s pulzním měničem	27
Závěr	30
Použitá literatura	31
Seznam příloh	32-33

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na simulaci dynamiky DC motoru při zatížení různými pracovními mechanizmy.

První kapitola nás seznámí se základním principem DC motoru a jeho stručného dělení podle způsobů buzení magnetického pole a popíše základní vlastnosti DC motoru s permanentními magnety a jeho napájením. V této práci bude motor zatížen různými pracovními mechanizmy - jsou zde popsány mechanické charakteristiky (Kalandrová, Ventilátorová, Výtahová, Hoblovková, Navíječková).

Druhá kapitola se zabývá tvorbou matematického modelu DC motoru, jsou zde odvozeny rovnice a zjednodušující předpoklady pro vytvoření blokového schématu DC motoru. Dále jsou zde odvozeny základní vztahy a zjednodušující předpoklady pro modelování čtyřkvadrantového pulzního měniče. Pro následnou simulaci jednotlivých mechanických charakteristik je důležité si vyjasnit vzájemnou závislost otáček a momentu pracovního mechanismu.

Třetí kapitola se věnuje sestavení simulačního modelu konkrétního DC motoru s permanentními magnety typu PM80S/2 napájeného čtyřkvadrantním pulzním měničem. Popisuje základní bloky Simulinku, které jsou potřebné pro simulaci a jednotlivé mechanické charakteristiky, které jsou charakterizovány pomocí souboru m-file.

Čtvrtá kapitola obsahuje výsledné grafy všech důležitých veličin při simulaci. V první simulaci je jmenovitý moment motoru konstantní. Při druhé je motor napájen napětím s takovou náběžnou hranou, aby nebyl překročen dvojnásobně jmenovitý proud motoru při rozběhu. Poslední simulace nám má ukázat, jak se projeví účinnost převodu ve výtahové charakteristice.

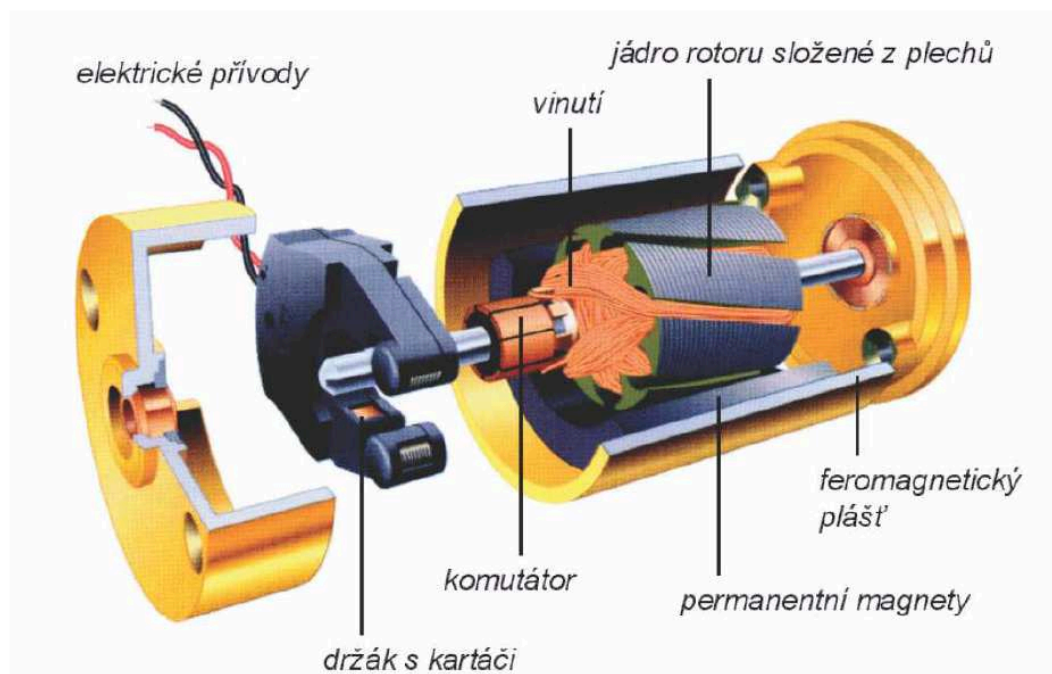
1. Popis struktury neregulovaného DC pohonu s pulzním měničem

1.1 Princip DC motoru

Ke svorkám motoru přivádíme stejnosměrný proud, který prochází vodiči kotvy (obr.1). Protože se tyto vodiče nacházejí v magnetickém poli, působí na ně jistá síla a motor se otáčí. Směr otáčení lze určit např. pravidlem levé ruky. Kdyby však vodiči procházel trvale stejnosměrný proud, přestaly by se vodiče pohybovat po dosažení neutrální polohy - v ose mezi dvěma sousedními póly. Aby se kotva mohla otáčet dále původním směrem, musí se smysl proudu v nich po přechodu od jednoho pólu ke druhému změnit. Tuto změnu smyslu proudu ve vodičích rotorového vinutí obstarává komutátor.

V homogenním magnetickém poli mezi dvěma póly se otáčí závit, jehož začátek a konec jsou připojeny na dva kroužky, které se spolu s ním otáčejí. Magnetický tok, spřažený s otáčejícím se závitem, se mění s časem podle sinusovky a v závitě se indukují střídavé napětí. Polarita obou kroužků se periodicky mění podle toho, zda vodič spojený s kroužkem je pod severním nebo jižním pólem. I proud, který prochází uzavřeným vnějším obvodem, je střídavý.

Komutátor u stejnosměrného motoru mění smysl proudu ve vodičích rotoru tak, že se rotor otáčí trvale jedním směrem. Tažná síla motoru pulsuje podobně, jako pulsuje indukované napětí dynama. Čím více cívek má motor, tím je tah plynulejší. Zmenšuje se tím, že se některé cívkou během komutace spojují kartáči nakrátko a nepřispívají k vytváření točivého momentu.



Obr. 1. Řez moderním stejnosměrným servomotorem s permanentními magnety

1.2 Dělení DC motorů podle způsobů buzení magnetického pole

DC motory s cizím buzením - budící vinutí umístěné ve statoru je napájeno elektrickou energií ze zvláštního (samostatného) zdroje nebo motor využívá pevných magnetů s tvarově příslušnými pólovými nástavci umístěnými jako nedílná součást statoru + rotorové vinutí je napájeno z jiného (samostatného) zdroje.

DC motory s vlastním buzením - budící vinutí je určitým způsobem spojeno s vinutím rotoru. Vinutí statoru i rotoru je napájeno z jediného společného zdroje, dále se dělí podle druhu propojení:

-buzení (zapojení) derivační – vinutí rotoru a statoru jsou zapojeny paralelně (vedle sebe) a prochází jimi proud rozdílné velikosti.

-buzení (zapojení) sériové – vinutí rotoru a statoru jsou zapojeny do série (za sebou) a prochází jimi proud stejné (shodné) velikosti.

-buzení (zapojení) kompaundní (sdružené) – kombinace obou předcházejících, kdy magnetizační statorové vinutí je složeno z (minimálně) dvou cívek, z nichž jedna je v sérii s rotorovým vinutím a druhá paralelně.

1.3 Stejnoseměrný motor s permanentními magnety

Používají se zejména v oblasti od velmi malých až do středních výkonů. U nejmenších výkonů je lze využívat i přímo, bez regulačních obvodů, u středních výkonů (servopohonů) se obvykle používá k jejich napájení pulzních měničů.

Mezi výhody motoru s permanentním magnetem patří zejména velice příznivý poměr výkon/hmotnost, relativně snadné řízení otáček, u běžných typů pak také cena a dostupnost, široká nabídka. Mezi nevýhody patří složitější a tedy dražší rychlostní a zejména polohové řízení v porovnání například s krokovým motorem, dále díky komutátoru je pak tento motor zdrojem elektromagnetického rušení a také není bezúdržbový. Stejnoseměrný motor obvykle pracuje při relativně vysokých otáčkách a nízkém momentu, což je pro potřebu pohonů mobilních robotů nevýhodné. Řešením je použít převodovku (obr. 3). Tato převodovka, může být již součástí daného motoru. Spolu s převodovkou se motor také může dodávat již se senzorem polohy nebo rychlosti. Výhodou je celková kompaktnost takového pohonu.

Konstrukční provedení těchto speciálních motorů, které se vyznačují velkou proudovou (a tudíž momentovou) přetížitelností (až $10 \times I_n$), malou elektromagnetickou i mechanickou časovou konstantou. Dobré vlastnosti těchto pohonů vyplývají z toho, že budící magnetický tok je kolmý na směr proudu kotvy a motor tak vyvíjí vždy maximální moment. Této vlastnosti se u střídavých regulačních pohonů dosahuje složitými regulačními obvody.

V normálním prostředí se dosahuje i dobré provozní spolehlivosti pohonu. Mechanický komutátor a sběrné ústrojí motoru však v každém případě představuje nejslabší místo tohoto pohonu.



Obr. 2. Příklad malého stejnosměrného motorku



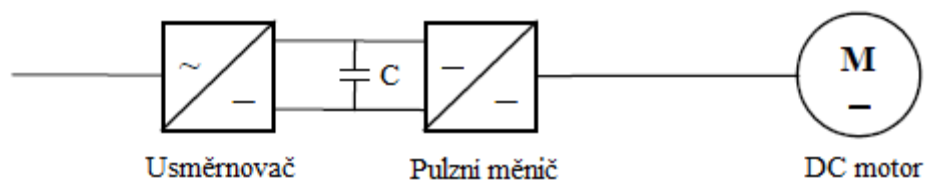
Obr. 3. Odkrytována převodovka

1.4 Zapojení DC motoru s pulzním měničem

Stejnoseměrné (pulzní) měniče slouží k řízení velikosti stejnosměrného napětí. Realizují se obvykle pomocí tyristorů. Mohou však být provedeny i v tranzistorové verzi. Na funkci pulzních měničů se tím nic nemění. Tranzistorové pulzní měniče se používají pro pohony menších výkonů s většími nároky na dynamiku regulace. Připouštějí vyšší frekvence spínání a nevyžadují komutační obvody. To však neznamená, že jsou jednodušší.

Pulzní měniče se používají v elektrické trakci (pohony trolejbusů, tramvají, vozů podzemní dráhy, elektromobilů, lokomotiv) i v průmyslových aplikacích (pohony obráběcích strojů, manipulátorů, robotů). Tím však jejich oblast použití není ani omezena, ani vyčerpána.

Uvažujme konfiguraci s diodovým usměrňovačem, napěťovým DC meziobvodem a pulzním měničem (obr. 4). Z důvodu použití diodového usměrňovače platí, že napětí v DC meziobvodu bude při konstantním napětí sítě rovněž konstantní. Díky kondenzátoru zapojeného v DC meziobvodu je účinník základní harmonické prakticky roven jedné (celkový účinník respektující vyšší harmonické může být menší než 1).



Obr. 4. Zapojení DC pohonu s pulzním měničem

1.5 Pracovní mechanizmy

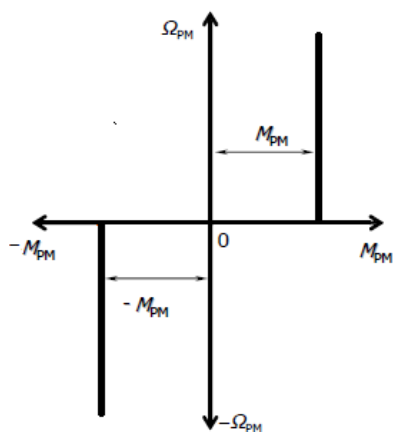
Základní mechatronický systém je tvořen na jedné straně motorem (nejčastěji elektrickým), na straně druhé pak daným pracovním mechanismem. Každý takovýto pracovní mechanismus je v zásadě charakterizován třemi následujícími veličinami:

- rychlostí W_{pm}
- momentem pracovního mechanismu M_{pm}
- momentem setrvačnosti pracovního mechanismu J_{pm}

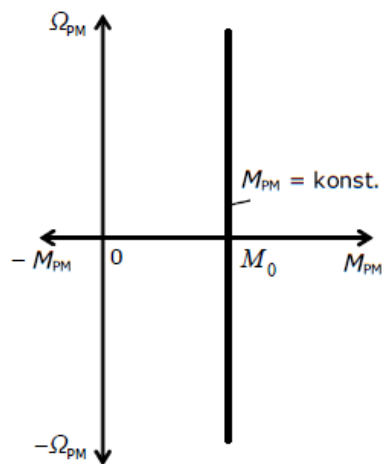
Všechny tyto veličiny jsou vzhledem k sobě vzájemně vázány a dále ještě závisí na čase, případně jiných veličinách. Zatěžovací moment M_{mp} pracovního mechanismu působí obecně proti pohybu, ale za určitých podmínek ho může i podporovat. Z tohoto hlediska můžeme zátěžové momenty rozdělit do dvou skupin:

-Zatěžovací moment reakční (pasivní) působí vždy proti momentu vytvářející pohyb a má brzdný účinek. Pasivními zatěžovacími momenty působí mechanismy, v nichž dochází k obrábění, tváření, k tření, k překonání odporu vzduchu či jiného prostředí. Pasivní zatěžovací momenty mění smysl při změně smyslu otáčení, jak je naznačeno na obr. 5.

- Zatěžovací moment potenciální (aktivní) je typický tím, že při změně smyslu rychlosti nemění svůj smysl (obr. 6). Aktivním zatěžovacím momentem jsou charakterizovány ty pracovní mechanismy, u nichž dochází ke změnám potenciální energie látek či těles. Jsou vyvolány např. tíhovým zrychlením nebo napínáním pružin.



Obr. 5. Reakční zatěžovací moment

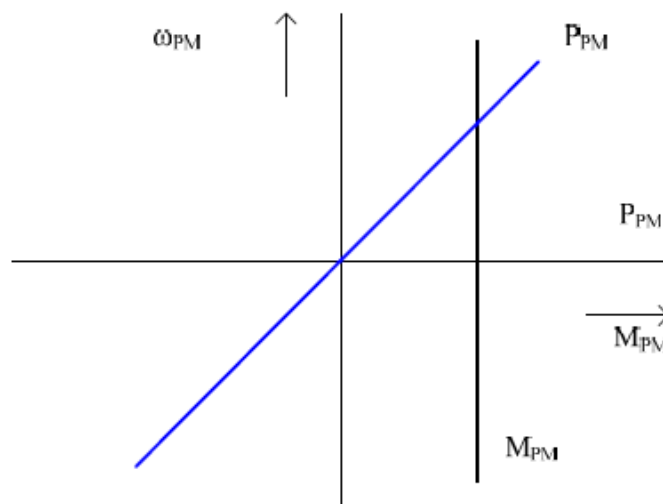


Obr. 6. Potenciální zatěžovací moment

Další charakteristickou veličinou, podle které provádíme třídění pracovních mechanismů je jejich mechanická charakteristika.

Výtahová charakteristika

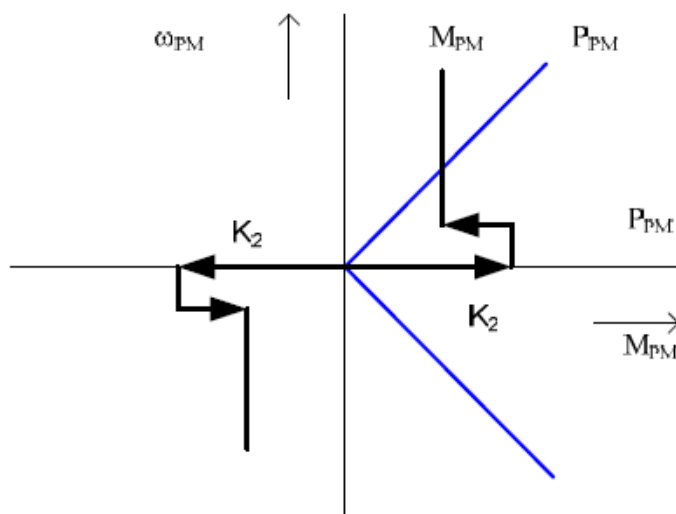
Patří sem mechanismy, které spouštějí a zvedají zátěže o tíže G . Jejich moment je potencionální. Typickými představiteli této skupiny jsou jeřáby, výtahy, těžební stroje.



Obr. 7. Výtahová charakteristika

Hoblovková charakteristika

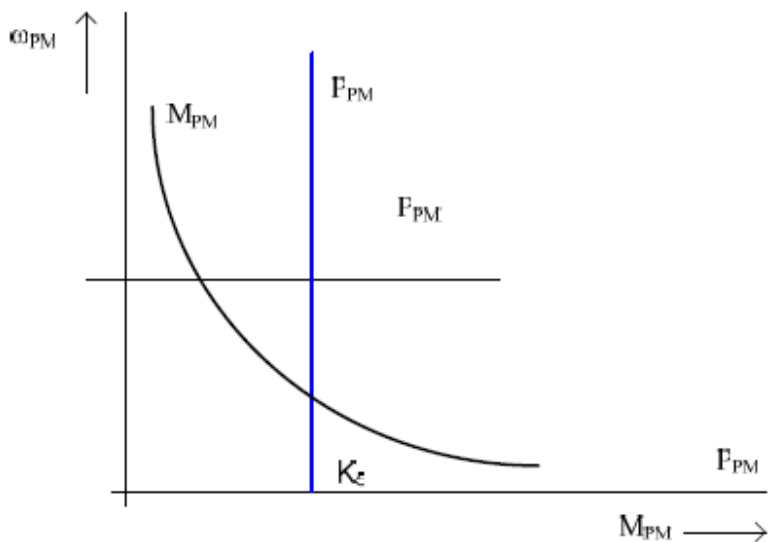
Patří sem obráběcí trískové stroje, pracující s konstantní řeznou silou a řeznou plochou (hoblovky), mechanická stavěcí zařízení (ventily, šoupátka, škrťací klapky), pojezdy bagrů a jeřábů, mlýny.



Obr. 8. Hoblovková charakteristika

Navíječková charakteristika

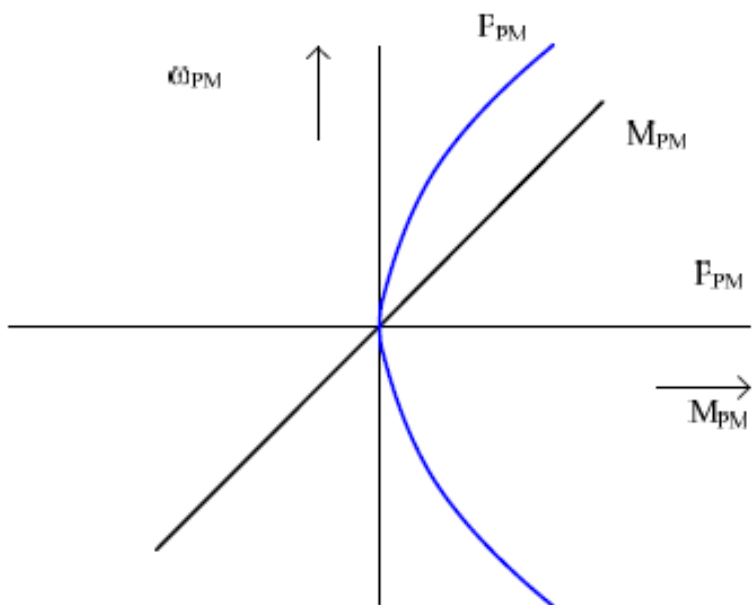
Patří zde mechanismy, vyžadující při změně rychlosti stálý výkon, patří sem především navíječka s konstantním tahem při konstantní rychlosti (na plech, papír, textil).



Obr. 9. Navíječková charakteristika

Kalandrová charakteristika

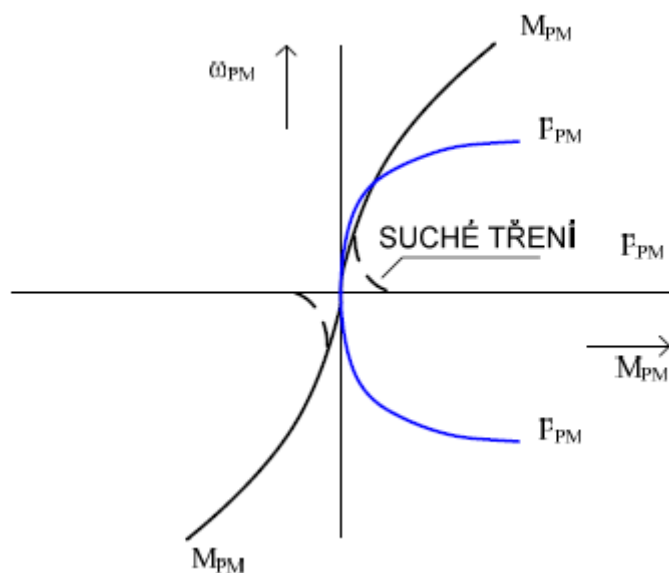
Typickým představitelem jsou kalandry (válce pro zpracování papíru, textilu, gumy).



Obr. 10. Kalandrová charakteristika

Ventilátorová charakteristika

Do této skupiny patří pracovní stroje překonávající odpor vzduchu a tekutiny tj. ventilátory, lodní šrouby, odstředivé čerpadla, turbodmýchadla, rychloběžné brusky a turbokompresory.



Obr. 11. Ventilátorová charakteristika

2. Vytvoření matematického modelu DC pohonu

2.1 Vytvoření matematického modelu motoru

Výdeme z rovnic DC motoru s permanentními magnety se zahrnutím elektromagnetických dějů a s uvažováním obvyklých zjednodušujících předpokladů a to:

- konstantní parametry (indukčnosti, odpory, $c\Phi$)
- zanedbání reakce kotvy

Rovnice vyjádřené v časové oblasti:

$$u_a = u_i + R_{ac} * i_a + L_{ac} \left(\frac{di_a}{dt} \right) \quad (2.11a)$$

$$T_{ac} = \frac{L_{ac}}{R_{ac}} \quad (2.12a)$$

$$u_i = c\Phi * \Omega_m \quad (2.13a)$$

$$M_e = c\Phi * i_a \quad (2.14a)$$

$$M_e - M_L = Jc \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.15a)$$

Rovnice po Laplaceově transformaci:

$$U_a(p) = U_i(p) + R_{ac} * I_a(p) + L_{ac}(p) * I_a(p) \quad (2.11b)$$

$$U_a(p) = U_i(p) + R_{ac} * I_a(p) * (1 + pT_{ac}) \quad (2.12b)$$

$$U_i(p) = c\Phi * \Omega_m(p) \quad (2.13b)$$

$$M_e(p) = c\Phi * I_a(p) \quad (2.14b)$$

$$M_e(p) - M_L(p) = Jc(p) * \Omega_m(p) \quad (2.15b)$$

Dalším krokem je převod na operátorové přenosy:

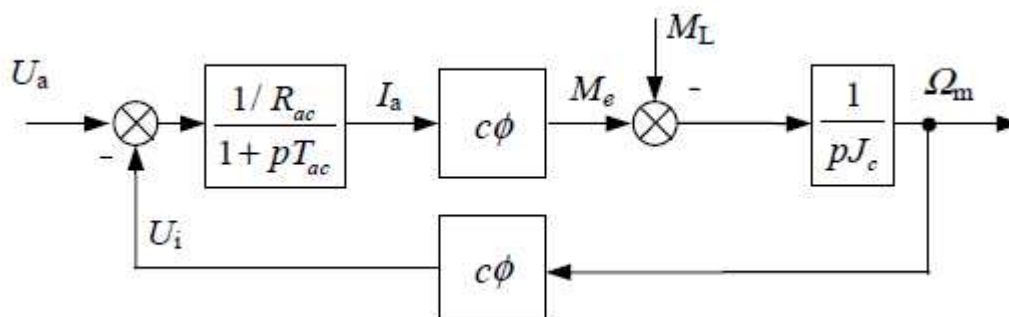
$$F_a(p) = \frac{I_a(p)}{U_a(p) - U_i(p)} = \frac{\frac{1}{R_{ac}}}{1 + pT_{ac}} \quad (2.16)$$

$$F_{c\Phi}(p) = \frac{U_i(p)}{\Omega_m(p)} \quad (2.17)$$

$$F_{c\Phi}(p) = \frac{M_c(p)}{I_a(p)} \quad (2.18)$$

$$F_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{M_c(p) - M_L(p)} = \frac{1}{pJ_c} \quad (2.19)$$

Vytvořené blokové schéma DC motoru:



Obr. 12. Blokové schéma stejnosměrného motoru

2.2 Vytvoření matematického modelu čtyřkvadrantového pulzního měniče

Zjednodušující předpoklady pro modelování těchto měničů jsou následující:

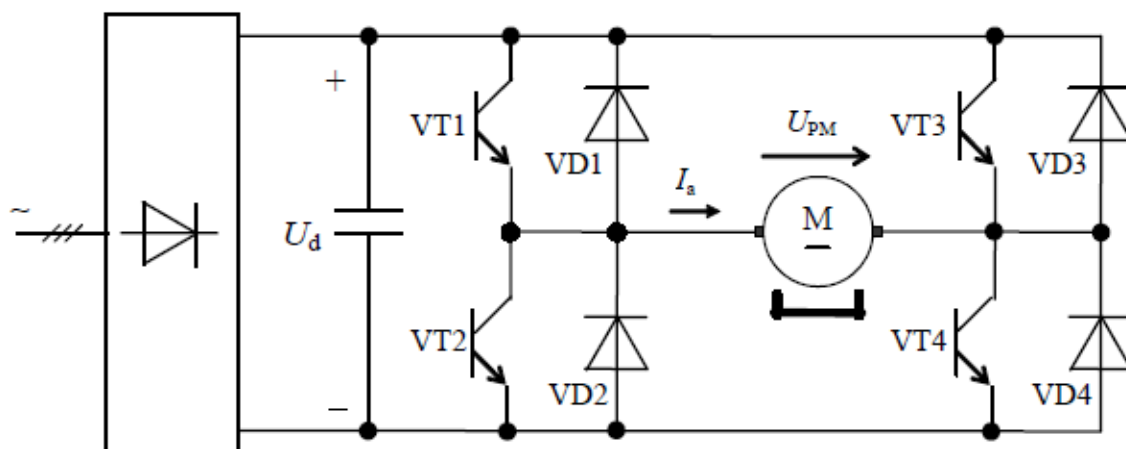
a) Ideální napájecí síť:

- nulová impedance napájecí sítě

b) Ideální polovodičové prvky měniče s:

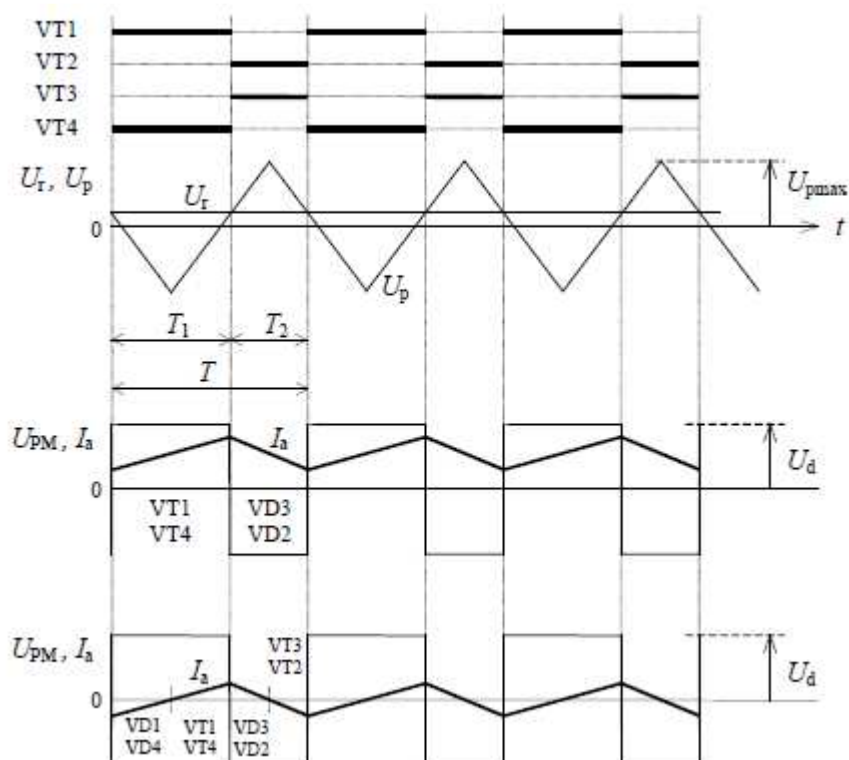
- nulovým odporem v sepnutém stavu
- nekonečným odporem v rozepnutém stavu
- okamžitým spínáním, resp. rozepínáním tranzistorů - ideální komutace

Uvažujme zapojení čtyřkvadrantového pulzního měniče dle obr. 13 používaného pro napájení stejnosměrných servomotorů s permanentními magnety.



Obr. 13. Zapojení čtyřkvadrantového pulzního měniče

Bipolární obousměrné řízení:



Obr. 14. Průběhy veličin při bipolárním obousměrném řízení čtyřkvadrantového pulzního měniče se zanedbáním ochranné doby

Při tomto řízení dle obr. 14 nemusí být identifikován směr proudu zátěže, protože tranzistory ve větvi jsou preventivně střídavě zapínány bez ohledu na aktuální směr proudu. To, že je přiveden na tranzistor spínací signál, ale ještě nutně neznamená, že poteče tímto tranzistorem (ve směru kolektor-emitor) proud. Je-li směr proudu opačný, vede antiparalelní dioda.

V modelu tohoto čtyřkvadrantového pulzního měniče je uvažován ještě další zjednodušující předpoklad a to nulová tzv. ochranná doba, což je časová prodleva mezi vypnutím jednoho a zapnutím druhého tranzistoru ve větvi. Z obr. 14 plyne, že se na zátěži může během jedné periody změnit jak polarita napětí, tak směr proudu (při malém zatížení motoru dostáváme střídavý proud se stejnosměrnou složkou).

Model pulzního měniče můžeme sestavit ze dvou kvalitativně odlišných pohledů:

S uvažováním pouze střední hodnoty výstupního stejnosměrného napětí

Výjdeme z rovnice přenosu:

$$F_{PM}(p) = \frac{U_s(p)}{U_r(p)} = K_{pm} * e^{-pT_{pm}} \approx K_{pm} \frac{1}{1 + pT_{PM}} \quad (2.21)$$

$$T_{PM} = \frac{1}{2 * f} = \frac{T}{2} \quad (2.22)$$

Pro střední hodnotu výstupního ss napětí lze z obr. 14 psát následující vztah:

$$\begin{aligned} U_s &= U_d * \frac{(T_1 - T_2)}{T} = U_d * \frac{(T_1 - T + T_1)}{T} = U_d * \left(\frac{2 * T_1}{T} - 1 \right) = \\ &= U_d * \left(1 + \frac{U_r}{U_{p \max}} - 1 \right) = U_d * \frac{U_r}{U_{p \max}} = K_{PM} * U_r \end{aligned} \quad (2.23)$$

V rovnici (2.23) byla použita závislost pro spínací poměr:

$$\frac{T_1}{T} = \frac{U_{p \max} + U_r}{2 * U_{p \max}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{U_r}{U_{p \max}} \right) \quad (2.24)$$

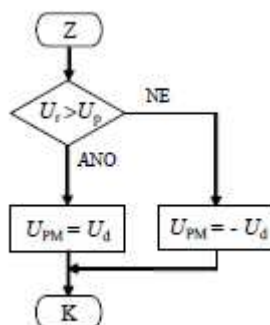
Zesílení pulzního měniče:

$$K_{PM} = \frac{U_s}{U_r} = \frac{U_d}{U_r} * \frac{U_r}{U_{p \max}} = \frac{U_d}{U_{p \max}} \quad (2.25)$$

Zesílení KPM je konstantní, nezávislé na pracovním bodě (U_r).

S uvažováním okamžitých průběhů veličin

Z předchozího rozboru plyne jednoduchý postup pro určení okamžité hodnoty výstupního napětí pulzního měniče při bipolárním obousměrném řízení (při zanedbání ochranné doby). Pokud $U_r > U_p$ pak $U_{PM} = U_d$ jinak $U_{PM} = -U_d$.



Obr. 15. Vývojový diagram pro určení výstupního napětí čtyřkvadrantového pulzního měniče při bipolárním obousměrném řízení

2.3 Vytvoření matematického modelu pracovního mechanismu

Z hlediska rozdělení pracovních mechanismů můžeme v zásadě hovořit o pracovních mechanismech s konstantním zatěžovacím momentem a pracovních mechanismech, jejichž moment je závislý na rychlosti.

Pro zatěžovací moment pracovních mechanismů s rotačním pohybem platí:

$$M_p = M_{p0} + (M_{pn} - M_{p0}) * \left[\frac{\omega}{\omega_n} \right]^x \quad (2.31)$$

M_p - zatěžovací moment pracovního mechanismu při úhlové rychlosti ω

M_{p0} - zatěžovací pasivní moment pracovního mechanismu (při $\omega = 0$)

M_{pn} - zatěžovací pasivní moment pracovního při jmenovité rychlosti ($\omega = \omega_n$)

ω - úhlová rychlost pracovního mechanismu

ω_n - jmenovitá úhlová rychlost

x - koeficient vyjadřující změnu zátěžového momentu při změně úhlové rychlosti

Výtahová charakteristika – stálý pracovní moment - exponent $x = 0$

Moment je při exponentu $x=0$ konstantní $M_p = k$ (obr. 9), nezávislý na rychlosti. Výkon je úměrný rychlosti a při změně smyslu rychlosti mění znaménko.

$$M_p = M_{p0} + (M_{pn} - M_{p0}) * \left[\frac{\omega}{\omega_n} \right]^0 \quad (2.32)$$

$$M_p = M_{p0} + M_{pn} - M_{p0}$$

$$M_p = M_{pn} = k$$

Výkon

$$P_p = M_p * \omega_p = k * \omega_p \quad (2.33)$$

Hoblovková charakteristika – stálý pracovní moment - exponent $x = 0$

Moment je opět konstantní, ale se změnou smyslu rychlosti se mění jeho znaménko (reakční moment). Výkon při změně smyslu rychlosti zůstává kladný.

$$M_p = k * \text{sign} \omega_p \quad (2.34)$$

Výkon

$$P_p = k * |\omega_p| \quad (2.35)$$

Navíječková charakteristika - exponent $x = -1$

Zatěžovací moment je nepřímo úměrný rychlosti a výkon je přibližně konstantní. S rostoucím průměrem D navíjeného materiálu klesá rychlost ω_p a moment stoupá hyperbolicky.

$$M_p = M_{p0} + (M_{pn} - M_{p0}) * \omega_n * \frac{1}{\omega} \quad (2.36)$$

Výkon

$$P_p = \frac{P_p}{\omega_p} = \frac{k}{\omega_p} \quad (2.37)$$

Kalandrová charakteristika - exponent $x = 1$

V tomto případě roste moment lineárně s rychlostí, výkon s jejím čtvercem. Zahrnujeme sem i stroje, u nichž se silně uplatňuje viskozní tření měnící se s rychlostí, takže exponent je v mezích $0 < x \leq 1$.

$$M_p = M_{p0} + (M_{pn} - M_{p0}) * \frac{\omega}{\omega_n} \quad (2.39)$$

V případě, že $M_{p0} = 0$, redukuje se výraz na tvar

$$M_p = k * \omega \quad (2.40)$$

Výkon

$$P_p = M_p * \omega_p = k * \omega_p^2 \quad (2.41)$$

Ventilátorová charakteristika - exponent $x = 2$

Moment je úměrný čtverci rychlosti. Při nulové a malé rychlosti se uplatňuje suché tření.

$$M_p = M_{p0} + (M_{pn} - M_{p0}) * \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \quad (2.42)$$

Výkon

$$P_p = M_p * \omega_p = k * \omega_p^3 \quad (2.42)$$

3. Sestavení simulačního modelu DC pohonu

3.1 Sestavení simulačního modelu motoru

Pro simulaci využiji DC motor s permanentními magnety typu PM80S/2.

Základní parametry motoru ze štítku:

Jmenovitý výkon	400 W
Jmenovité napětí	24 V
Jmenovitý proud	20 A
Jmenovité otáčky	2800 ot/min

Další hodnoty (změřeno, vypočteno, katalogové hodnoty).

Odpor kotvy	$R_{ac} = 0,115 \Omega$
Indukčnost kotvy	$L_{ac} = 0,306 \text{ mH}$
Moment setrvačnosti	$J_c = 0,00125 \text{ Kgm}^2$
	$c\phi = 0,074 \text{ Vs}$

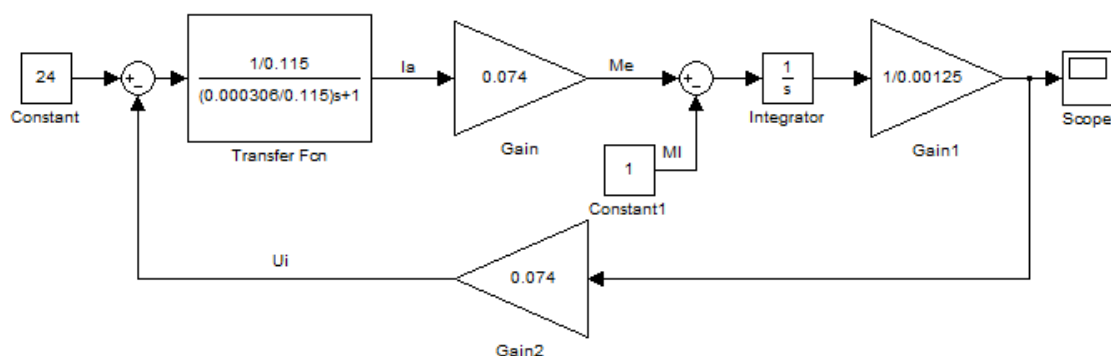
Jmenovitý moment:

$$M_n = c\phi * I_a \quad (3.11)$$

$$M_n = 0.074 * 20 = 1.48 \text{ Nm}$$

Přepočet jmenovitých otáček z ot/min na rad/s:

$$\frac{2800}{60} * 2 * \pi = 293.21 \text{ rad/s}$$



Obr. 16. Simulační model DC motoru

Simulační model DC pohonu jsem vytvořil v programu Matlab – Simulink s využitím standardních bloků v knihovně Simulinku.

Popis jednotlivých bloků:

Constant	<ul style="list-style-type: none">- generuje výstup s konstantní zadanou hodnotou- Constant - zadal jsem jmenovité napětí - 24 V- Constant1- zátěžový moment pracovního mechanismu
Transfer Fcn	<ul style="list-style-type: none">- reprezentuje model systému zadaného ve formě Laplaceova přenosu- reprezentuje rovnici (1-6)- do čitatele se zadává $1/R_{ac}$ a do jmenovatele $(L_{ac}/R_{ac})s+1$
Gain	<ul style="list-style-type: none">- násobí zadanou vstupní hodnotou- Gain = Gain2 - násobím konstantou $c\phi$- Gain1 - násobím převrácenou hodnotou momentu setrvačnosti ($1/J_c$)
Integrator	<ul style="list-style-type: none">- numericky integruje hodnoty vstupního signálu v závislosti na čase. Výstupem integrátoru v daném čase je hodnota určitého integrálu vstupu od spuštění simulace do aktuálního simulačního času- integruji moment setrvačnosti J_c
Scope	<ul style="list-style-type: none">- graficky zaznamenává průběh signálu, který přivedeme- výstupem ze simulačního modelu DC motoru jsou otáčky

3.2 Sestavení simulačního modelu čtyřkvadrantového pulzního měniče

Výstupní napětí čtyřkvadrantového pulzního měniče bude vstupním napětím DC motoru, proto $U_s = 24 \text{ V}$.

Hodnoty pro pulzní měnič:

$$U_s = 24 \text{ V}$$

$$U_d = 30 \text{ V}$$

$$U_{p\text{MAX}} = 10 \text{ V}$$

$$U_{p\text{MIN}} = -10 \text{ V}$$

$$f = 1 \text{ KHz}$$

Pro výpočet řídicího napětí U_r vycházíme z rovnice 2.23 :

$$U_s = U_d * \frac{U_r}{U_{p\text{max}}}$$

Po úpravě:

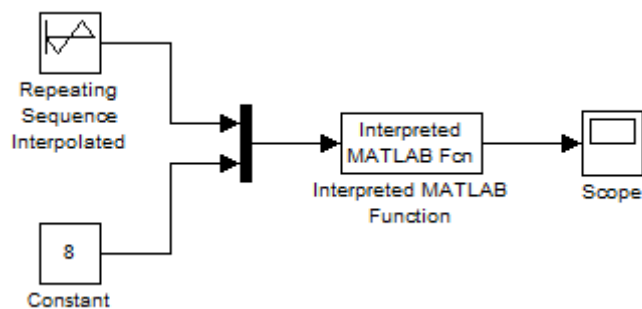
$$U_r = U_s * \frac{U_{p\text{max}}}{U_r} \quad (3.21)$$

$$U_r = 24 * \frac{10}{30} = 8V$$

Pro sestavení simulačního modelu budeme potřebovat znát dobu jedné periody:

$$T = \frac{1}{f} \quad (3.22)$$

$$T = \frac{1}{1000} = 0,001s$$



Obr. 17. Simulační model čtyřkvadrantového pulzního měniče

Popis jednotlivých bloků:

Constant - generuje výstup s konstantní zadanou hodnotou
- zadal jsem řídicí napětí 8 V

Mux - směšuje jednotlivé signály (přivedené na vstupní svorky) do jediného vícerozměrného signálu.

Scope - graficky zaznamenává průběh signálu, který je přiváděn
- výstupem ze simulačního modelu čtyřkvadrantového pulzního měniče je U_s

Repeating Semence Interpolated
- v tomto bloku si můžeme vygenerovat libovolný průběh
- v našem případě se bude jednat o pilovitý průběh napětí (tab. 1)

Tab. 1. Nastavení hodnot pro pilový průběh napětí

Nastavení hodnot napětí [V]	0	-10	0	10	0
Nastavení změny času napětí [s]	0	0,00025	0,0005	0,00075	0,001

Interpreted MATLAB function

- blok používající zadané funkce Matlabu
- budu porovnávat $U_r > U_p$ pak $U_{PM} = U_d$ jinak $U_{PM} = -U_d$.

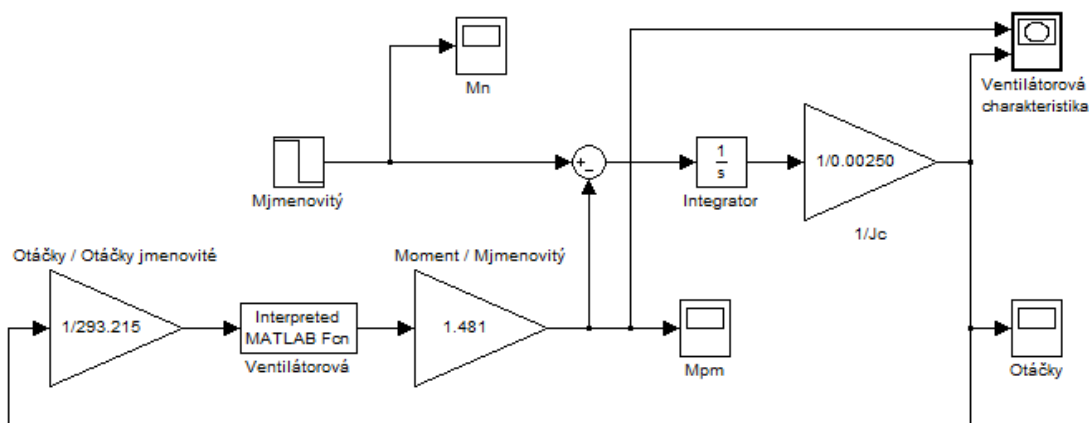
3.3 Sestavení simulačního modelu pracovního mechanismu

Jednotlivé pracovní mechanismy jsou charakterizovány v bloku Interpreted MATLAB function pomocí souboru m-file,.

Výpis ze souboru m – file pro konkrétní pracovní mechanismy a čtyřkvadrantový pulzní měnič jsou uvedeny v příloze.

3.4 Sestavení konkrétních simulačních modelů

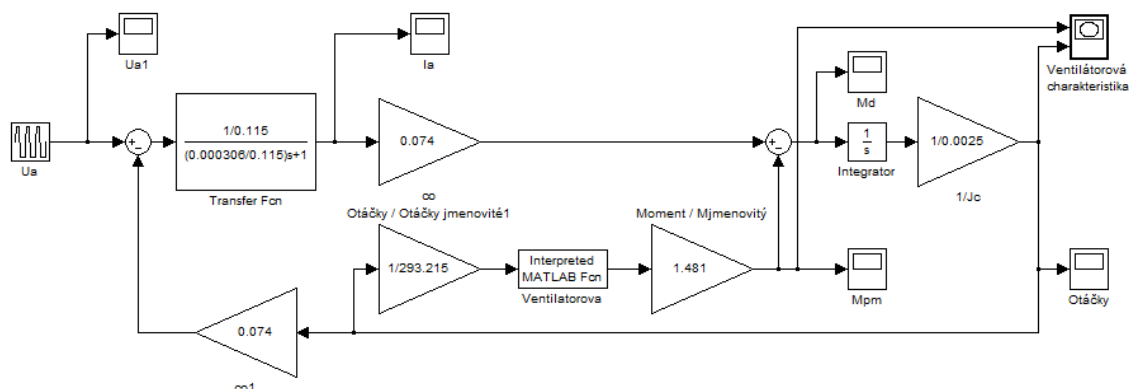
Konstantní jmenovitý moment M_n :



Obr. 18. Simulační model pro konstantní jmenovitý moment motoru

V tomto simulačním modulu je přiváděn konstantní jmenovitý moment M_n . Ve všech následujících simulacích se bude rovnat moment setrvačnosti motoru momentu setrvačnosti pracovního mechanismu. Simulace bude prováděna pro Ventilátorovou a Kalandrovou charakteristiku.

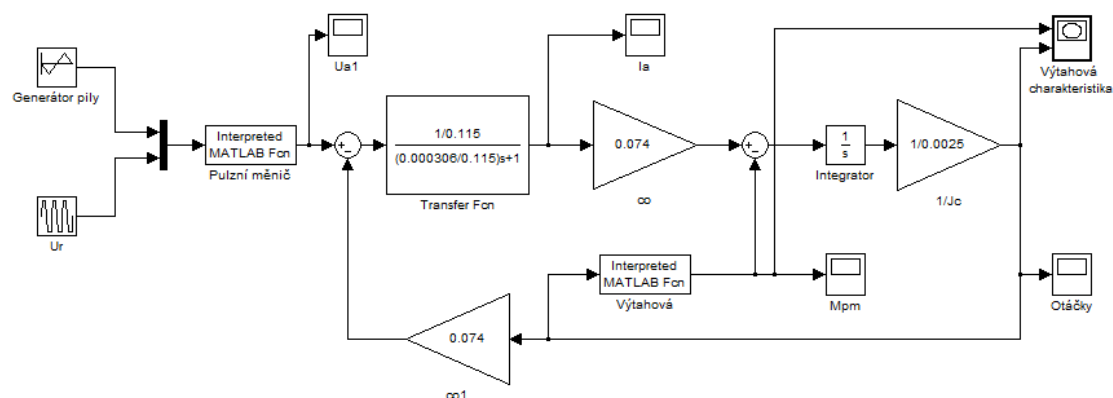
DC motor s náběžnou hranou napětí U_a :



Obr. 19. Simulační model pro DC motor s náběžnou hranou napětí U_a

Při této simulaci je motor napájen napětím U_a s takovou strmostí náběžné hrany, aby nebyla překročena dvojnásobně hodnota jmenovitého proudu I_n při rozběhu motoru.

DC motor s pulzním měničem:



Obr. 20. Simulační model DC motoru s pulzním měničem

Poslední simulační model obsahuje DC motor napájený pulzním měničem. Mezi motor a pracovní mechanismus charakterizovaný výtahovou charakteristikou byla vložena převodovka s převodem $i = 30$ a účinností převodu $\eta = 0,66$. DC pohon bude zvedat a spouštět vozík o hmotnosti 52,764 Kg. Průměr převáděcí kladky je 0,046 m.

$$G = m_v * g \quad (3.41)$$

$$G = 52,764 * 9,81 = 517,6N$$

Výpočet momentu pracovního mechanismu:

$$M_{pm} = G * \frac{d_k}{2} \quad (3.42)$$

$$M_{pm} = 517,6 * \frac{0,046}{2} = 11,9 Nm$$

Výpočet redukovaného momentu pracovního mechanismu pro zdvih:

$$M_{red} = \frac{M_{pm}}{i} * \frac{1}{\eta} \quad (3.43)$$

$$M_{red} = \frac{11,9}{30} * \frac{1}{0,66} = 0,601 Nm$$

Výpočet redukovaného momentu pracovního mechanismu pro spouštění:

$$M_{red} = \frac{M_{pm}}{i} * \eta \quad (3.44)$$

$$M_{red} = \frac{11,9}{30} * 0,66 = 0,262 Nm$$

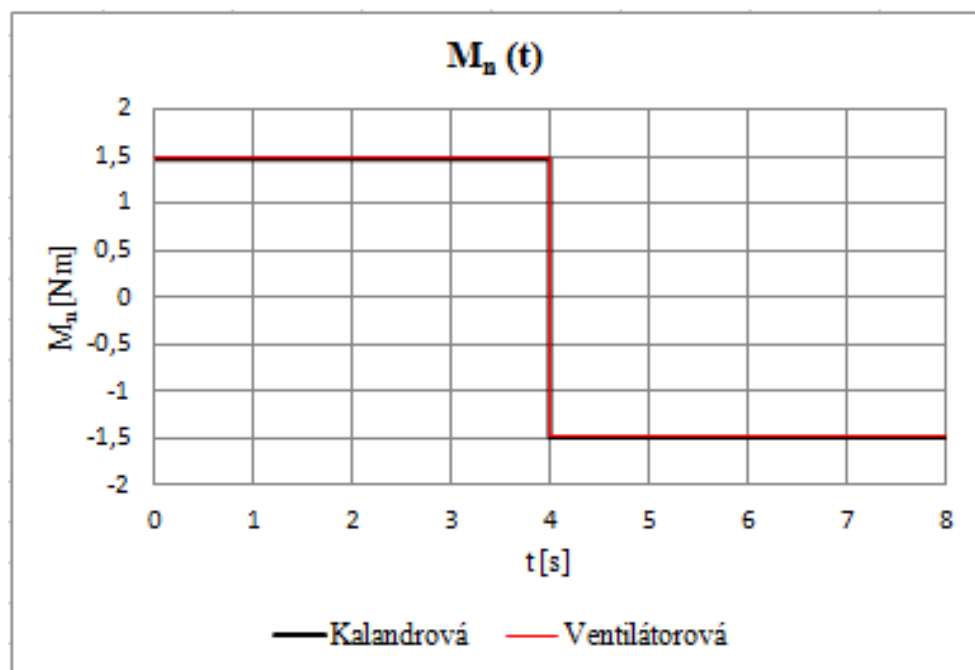
Nastavení hodnot pro U_r :

Tab. 2. Nastavení hodnot pro řídící napětí

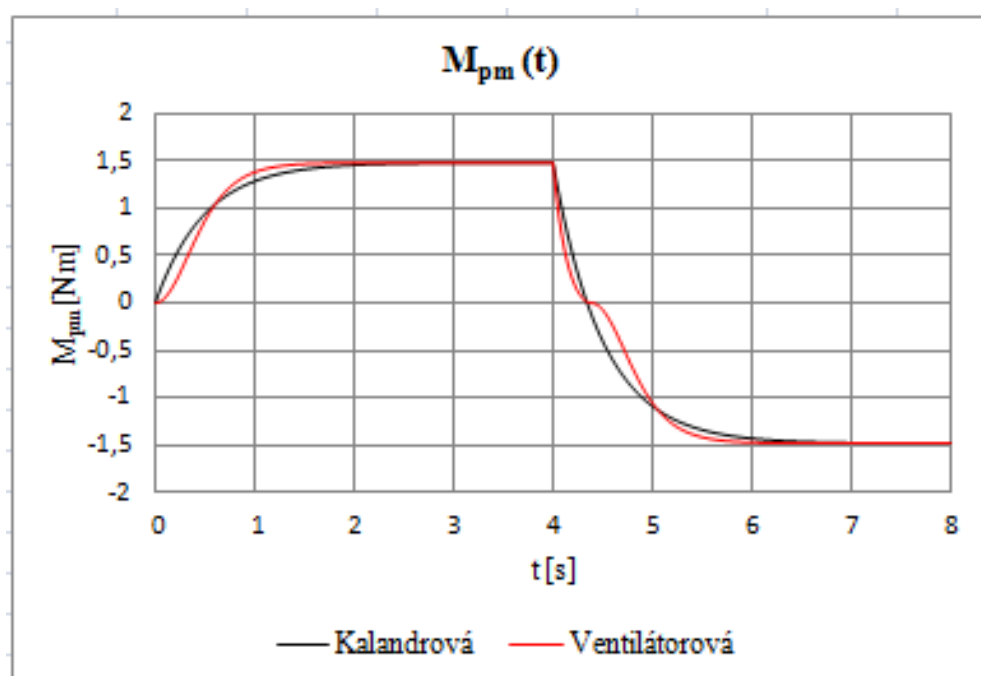
Nastavení hodnot napětí [V]	0	8	8	-8	-8
Nastavení změny času napětí [s]	0	1	2	4	5

4. Simulační ověření dynamiky DC pohonu

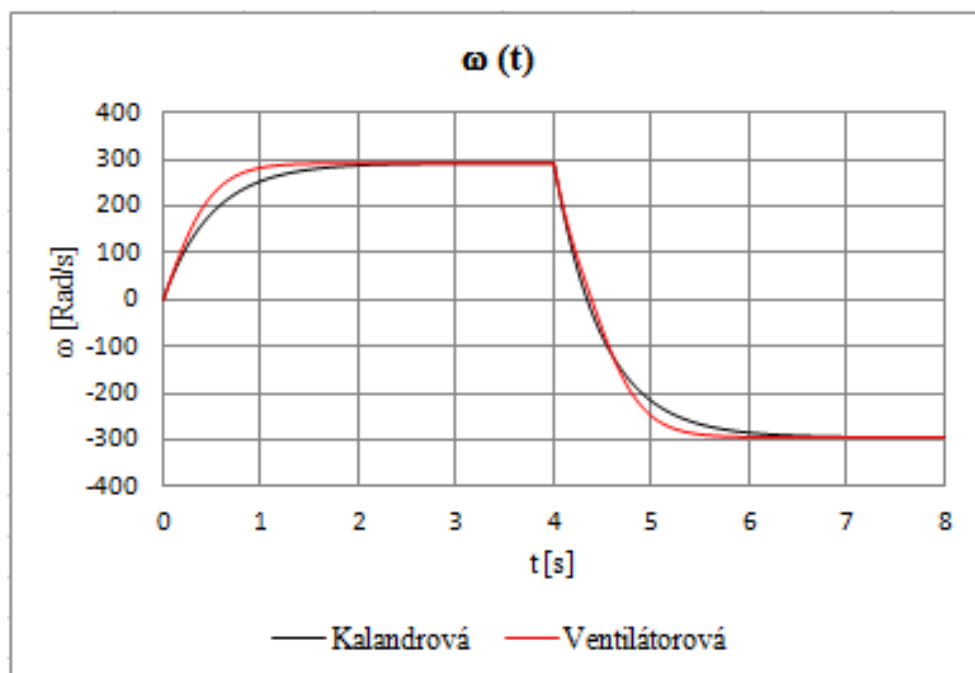
4.1 Konstantní jmenovitý moment M_n



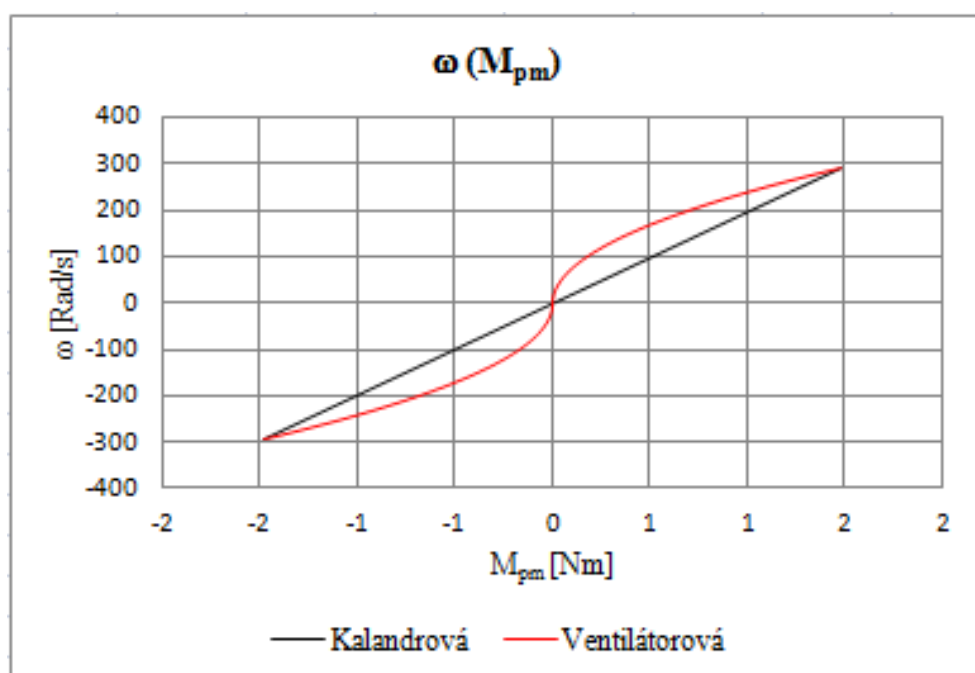
Obr. 21. Průběh jmenovitého momentu



Obr. 22. Průběh momentu pracovního mechanismu



Obr. 23. Průběh otáček

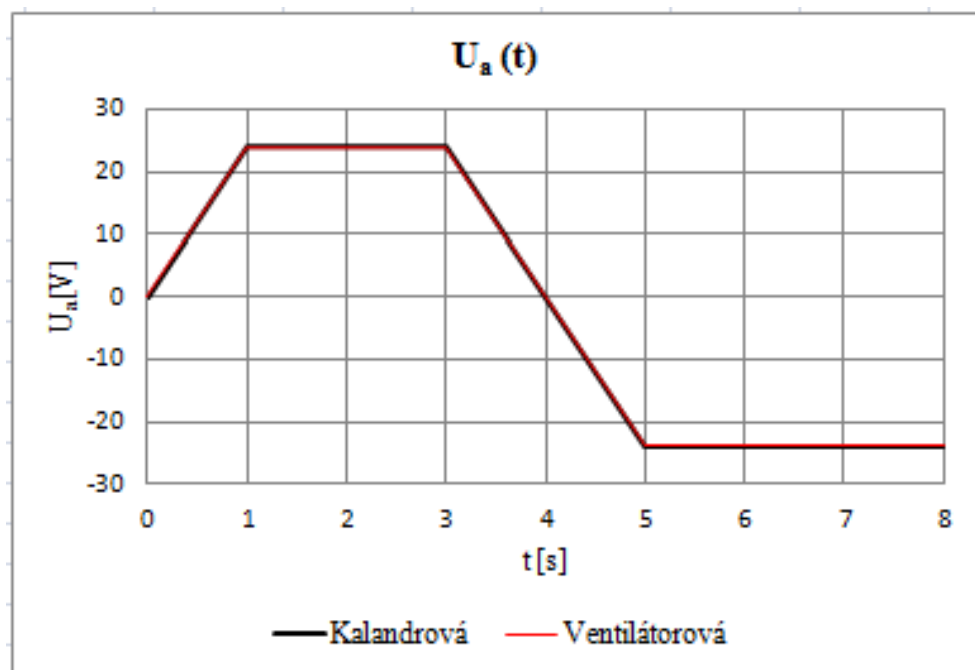


Obr. 24. Kalandrová a ventilátorová charakteristika

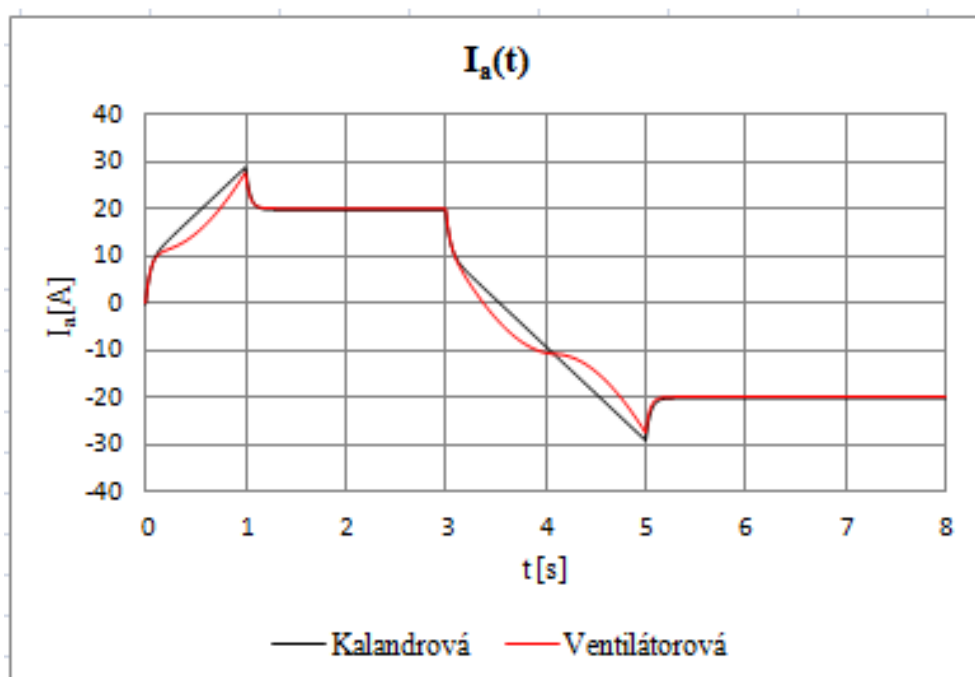
Z obr. 21 vidíme průběh konstantního jmenovitého momentu o velikosti 1,481 Nm. Moment M_n se ve čtvrté sekundě změní na záporný, což vede ke změně smyslu směru otáček, které můžeme sledovat na obr. 23. Ze srovnání Ventilátorové a Kalandrové charakteristiky lze usoudit (obr. 24), že při stejném momentu pracovního mechanismu má ventilátorová charakteristika větší otáčky (obr. 24). To je způsobeno výpočtem zatěžovacího momentu

pracovního mechanismu, kdy u kalandrové charakteristiky je exponent $x = 1$ a u ventilátorové je exponent $x = 2$.

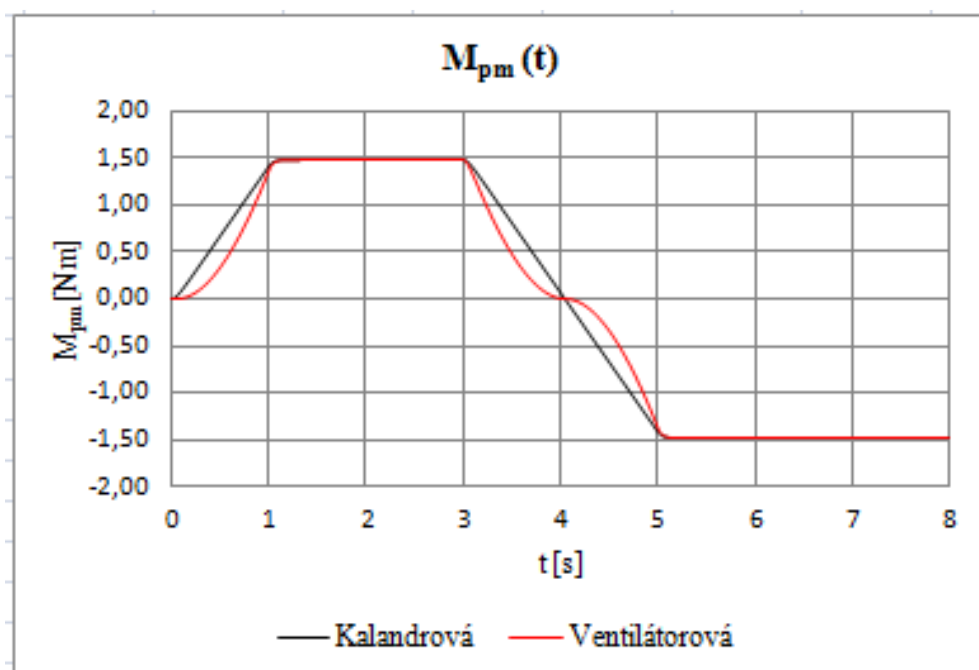
4.2 DC motor s náběžnou hranou napětí U_a



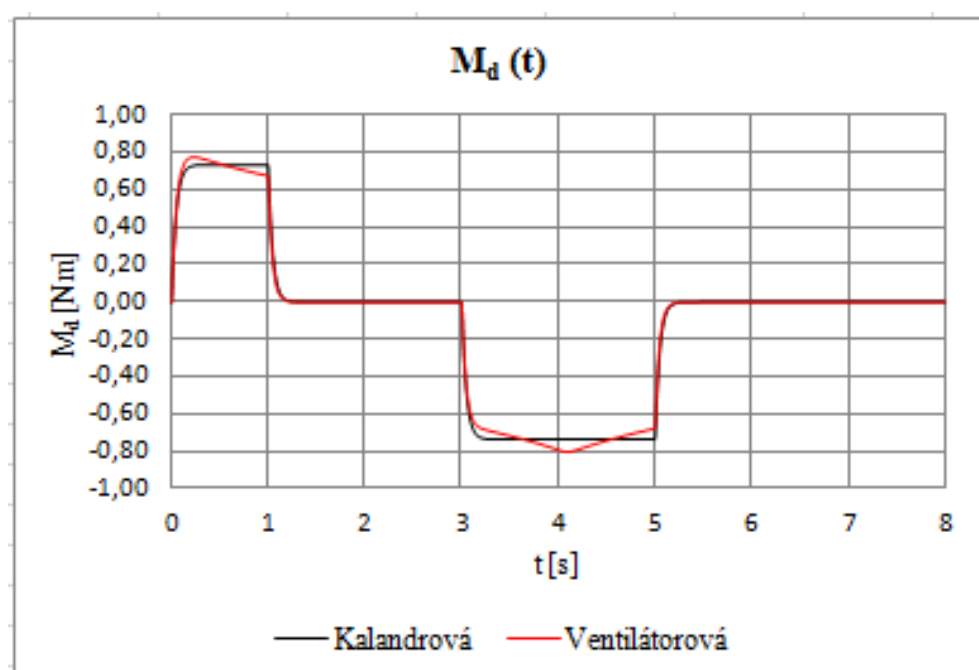
Obr. 25. Průběh napájecího napětí motoru



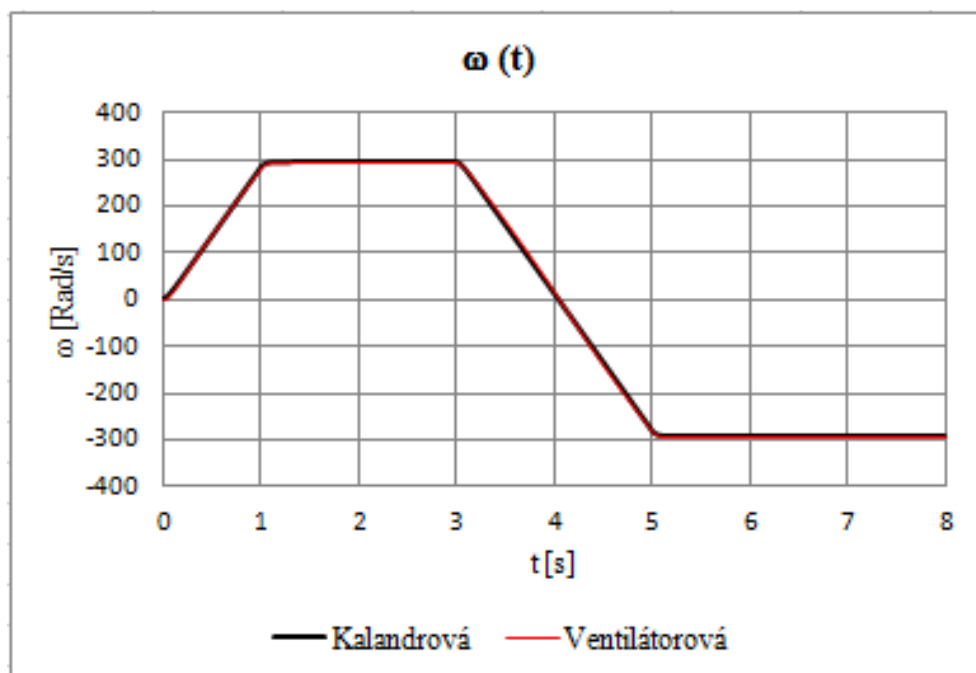
Obr. 26. Průběh proudu



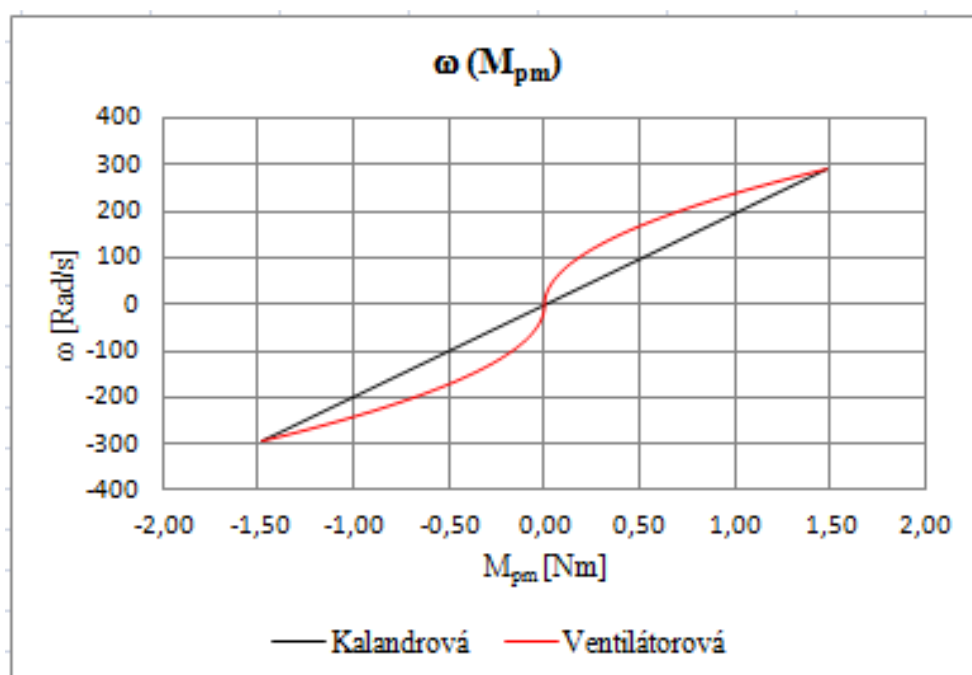
Obr. 27. Průběh momentu pracovního mechanismu



Obr. 28. Průběh dynamického momentu



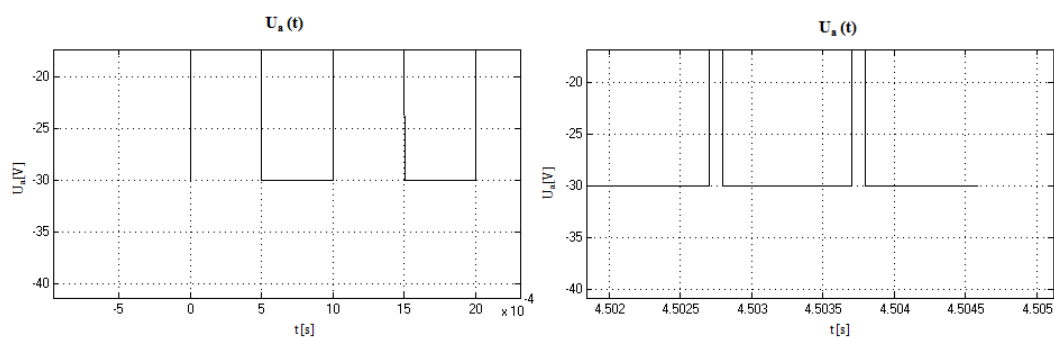
Obr. 29. Průběh otáček



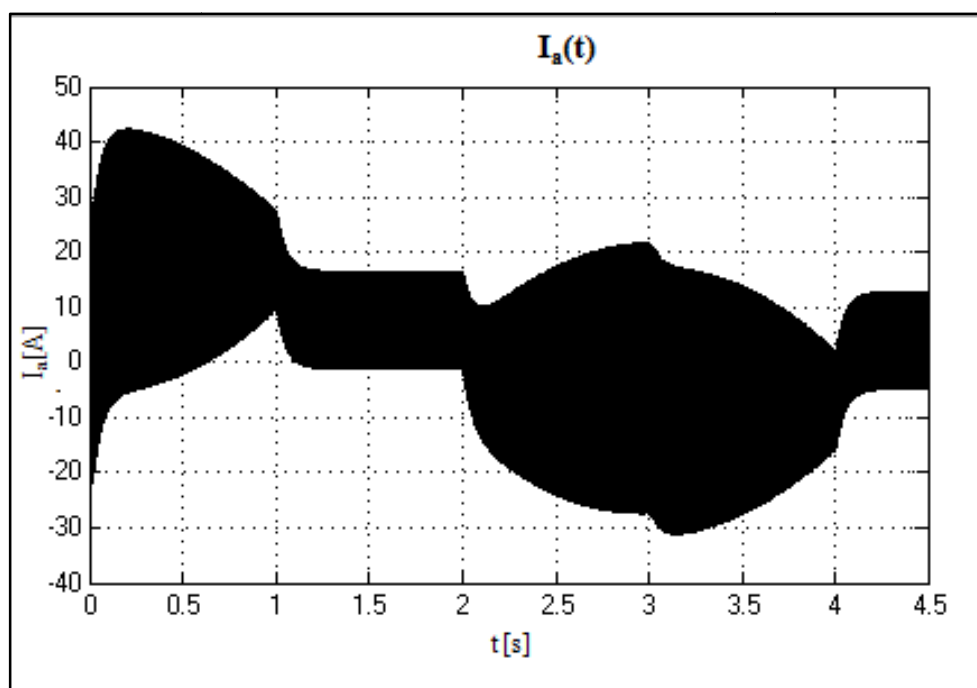
Obr. 30. Kalandrová a ventilátorová charakteristika

Motor je napájen napětím U_a (obr. 25) shodným pro obě charakteristiky. Strmost náběžné hrany byla volena s ohledem na podmínku, aby proud I_a nepřekročil dvojnásobnou hodnotu jmenovitého proudu (obr. 26) při rozběhu motoru. To má za následek téměř srovnatelné otáčky pro obě zkoumané charakteristiky (obr. 29). Rozdíl lze ovšem vidět na průběhu dynamického momentu (obr. 28) při rozbíhání motoru a při změně smyslu otáček. Na obr. 30 vidíme, že při momentu 1.481 Nm dosahujeme jmenovitých otáček 293.215 rad/s.

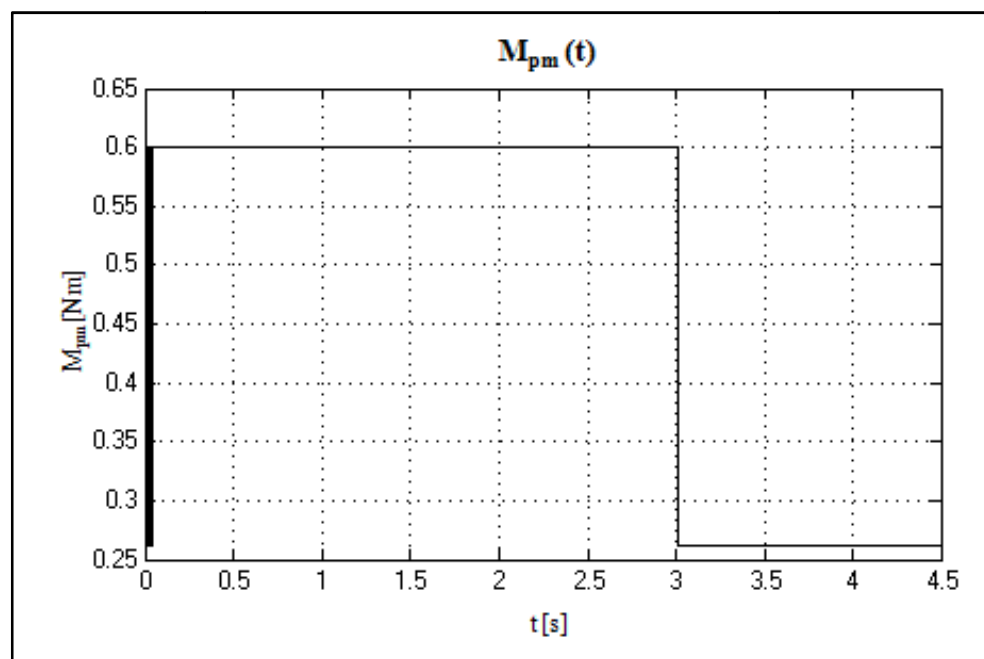
4.3 DC motor s pulzním měničem



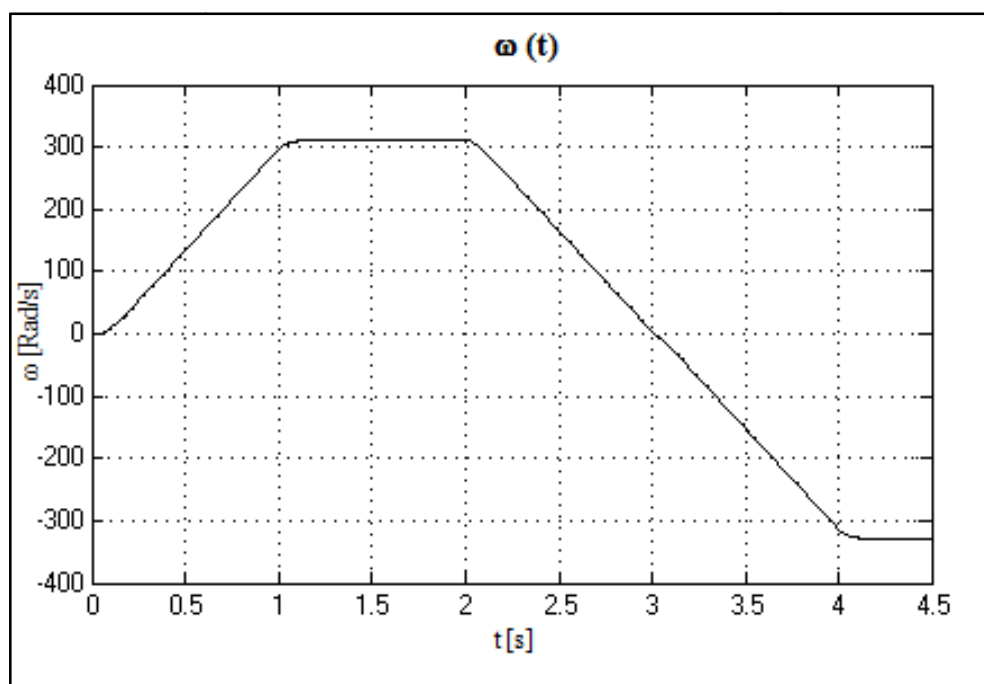
Obr. 31. Výřez z průběhu napájecího napětí motoru



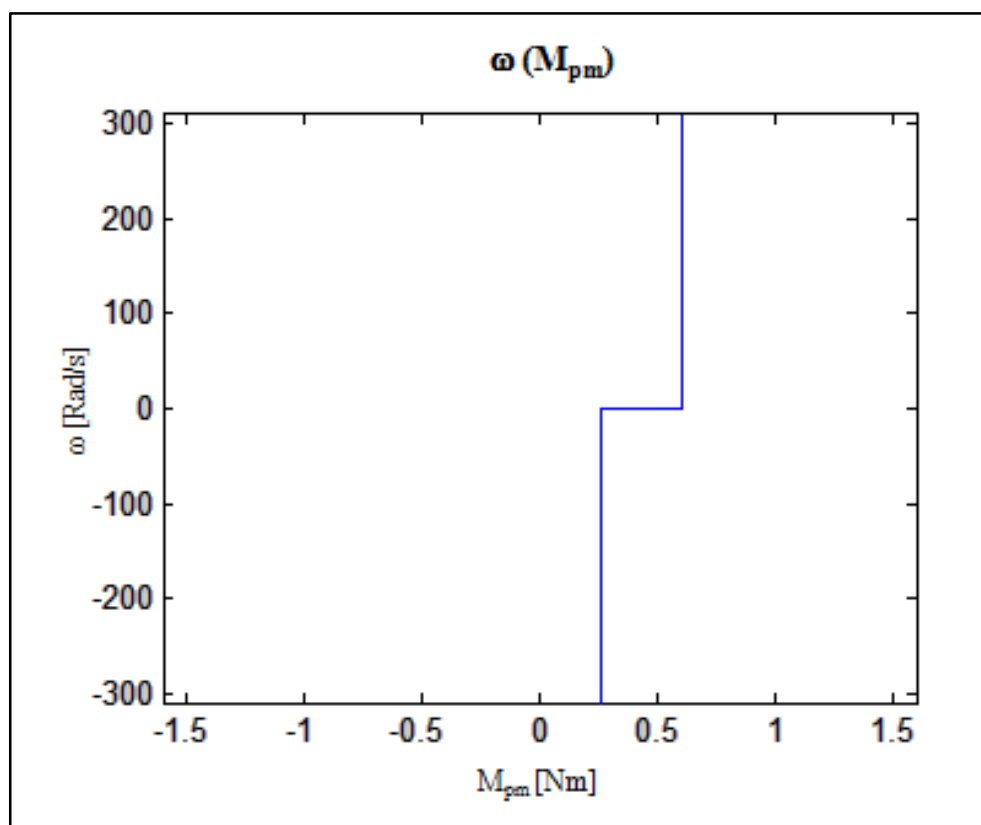
Obr. 32. Průběh proudu



Obr. 33. Průběh momentu pracovního mechanismu



Obr. 34. Průběh otáček



Obr. 35. Výtahová charakteristika

Touto simulací jsme si měli ověřit, jak se projeví účinnost převodu u výtahové charakteristiky při zdvihu a spuštění. DC motor jsme napájeli z čtyřkvadrantového pulzního měniče (obr. 31). Při změně smyslu otáček v 3. sekundě (obr. 34) lze pozorovat změnu zatěžovacího momentu pracovního mechanismu (obr. 33). Závislost otáček a zatěžovacího momentu pracovního mechanismu lze vidět na výtahové charakteristice (obr. 35), při zdvihu (kladné otáčky) je zatěžovací moment pracovního mechanismu 0,601 Nm a při spuštění (záporné otáčky) je tento moment 0,262 Nm.

Závěr:

Záměrem této bakalářské práce bylo odsimulování dynamiky DC pohonu v programu Matlab v jeho nadstavbové části Simulink. V úvodní kapitole jsme se seznámili s teoretickou částí DC pohonu, kterou jsme dále využili v další kapitole vytvoření matematického modelu DC motoru, pulzního měniče a pracovního mechanismu, kde jsme si odvodili i základní vztahy. V kapitole sestavení simulačních modelů jsme už zadali konkrétní hodnoty. Zde nastal problém u simulačního modelu DC motoru, který byl napájený čtyřkvadrantovým pulzním měničem. Musel jsem nastavit velký krok simulace a to 0,000001. Při větším kroku nefungoval pulzní měnič a dával konstantní napětí. Takto zvolený krok simulace měl za následek dlouhou dobu výpočtu. Dále pulzní měnič způsoboval velký rozkmit průběhů (obr. 32). Proto jsem ho v prvních dvou simulacích odstranil, aby šlo lépe porovnat průběhy. Na ukázkou funkčnosti jsem ho zařadil do poslední simulace, kde neměl takový vliv, protože jsem zkoumal vliv účinnosti převodovky. V první simulaci jsme si ověřili rozdíl mezi Kalandrovou a Ventilátorovou charakteristikou. Tento rozdíl jde vidět ve větších otáčkách při stejném zatěžovacím momentu u Ventilátorové charakteristiky. Tento rozdíl způsobuje exponent $x=2$ u výpočtu zatěžovacího momentu pracovního mechanismu. U druhé simulace se nám podařilo dodržet podmínky, aby proud při rozběhu nepřesáhl dvojnásobek jmenovitého proudu. To jsme dosáhli zvolenou strmostí nárustu napájecího napětí. To mělo za následek téměř stejný průběh otáček u Kalandrové i Ventilátorové charakteristiky. Rozdílnost obou charakteristik lze vidět na dynamickém momentu. U třetí simulace byl DC motor napájen čtyřkvadrantovým pulzním měničem, který způsoboval velký rozkmit průběhů. Z grafu napájecího napětí DC motoru nešlo nic vyčíst, proto jsem uvedl výřez ze začátku a konce průběhu, kde jde vidět šířka pulzu (obr. 31). Výsledkem simulace byla výtahová charakteristika, která znázorňuje vliv účinnosti na kladné a záporné otáčky. Všechny odsimulované charakteristiky se shodují s teoretickými předpoklady.

Použitá literatura:

- [1] Neborák, I.: Modelování a simulace elektronických systémů pro kombinované a distanční studium Část 2, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006
- [2] Neborák, I.: Mechatronické systémy pro kombinované a distanční studium, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009
- [3] Černý, M.: Elektrické pohony 1.díl. , 1976
- [4] Borba, L.: Elektrické pohony , Bratislava, 2005, ISBN 80-227-2305-3
- [5] Caha, Z., Černý, M.: Elektrické pohony, Praha, 1990, ISBN 80-03-00418-7

Seznam příloh:

Příloha 1: Výpis ze soubor m-file pro pulzní měnič

Příloha 2: Výpis ze soubor m-file pro Ventilátorovou charakteristiku

Příloha 3: Výpis ze soubor m-file pro Kalandrovu charakteristiku

Příloha 4: Výpis ze soubor m-file pro Výtahovou charakteristiku

Příloha 1: Výpis ze soubor m-file pro pulzní měnič

```
function[vystup]= měnič(vstup)

if vstup(1)<vstup(2);

vystup(1)=30;

else vystup(1)=-30;

end;

end
```

Příloha 2: Výpis ze soubor m-file pro Ventilátorovou charakteristiku

```
function[y]= ventilat(x)

if x<0;

y=-(x*x);

else y=x*x;

end
```

Příloha 3: Výpis ze soubor m-file pro Kalandrovu charakteristiku

```
function[y]= kalandrova(x)

y = x;
```

Příloha 4: Výpis ze soubor m-file pro Výtahovou charakteristiku

```
function[y]= vytah1(x)

if x>0

y=0.601;

else y=0.262;

end
```